

980913

Jämsä Heikki, Ruotoistenmäki Antti

Tielaitos

Kuormituskestävyyden tavoitekriteerit

*Tielaitoksen  
selvityksiä*

**3/1995**

Helsinki 1995

Tielaitos  
VTT

08 TIEL



Aiheluokka:

Avainsanat: väsyminen, vaurioituminen, tasaisuus, asfalttibetonirakenteet, maabetoni, kuormituskestävyys, TPPT, tavoitekriteerit, koeratakokeet

## Tiivistelmä

Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelman tavoitteena on teiden liikennöitävyyden parantaminen ja vuosikustannusten alentaminen. Tutkimusohjelman tavoitteet saavutetaan hallitsemalla tien tasaisuuteen vaikuttavat tekijät, jotka ovat rakenteen kuormituskestävyys, routakestävyys ja geotekninen kantavuus. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää liikennekuormituksen vaikutus tien tasaisuuteen. Tavoitteena oli lisäksi selvittää ne kriteerit, jotka tien tasaisuusvaatimus asettaa tierakenteen kuormituskestävyydelle.

Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden kasvua kumulatiivisen liikennesäätötilanteen ja siitä aiheutuvan vaurioitumisen seurauksena tarkasteltiin OECD:n Nantesin ja Nesteen koeratakokeiden perusteella. Kokeissa tutkittiin sekä asfalttibetoni- että maabetonirakenteita.

Tulosten perusteella todetaan, että ensimmäisen vaurion esiintymisen ja epätasaisuuden kasvun välinen yhteys on selkeä. Halkeama syntyy ensiksi rakenteen heikoimpaan kohtaan. Vaurioituminen alkaa päällysteen pohjassa ja aiheuttaa pinnan epätasaisuutta jo ennen kuin vauriot havaitaan pinnassa. Samanaikaisesti pinnan lisääntynyt epätasaisuus kiihdyttää rakenteen vaurioitumista. Vauriomäärän kasvaessa epätasaisuuden kasvu kiihtyy voimakkaasti.

Kuormituskestävyyden tavoitekriteerinä on siis halkeamien syntymisen estäminen. Ts. kunnostamistoimenpiteet tulisi tehdä ennen halkeilua, muuten seurauksena on epätasaisuuden nopea kasvu ja vanhan rakenteen kuormituskestävyyden menetys. Vaurioitumiseen ja sitä kautta tasaisuuteen vaikuttavat tekijät selvitetään kuormituskestävyysmalleja käsittelevissä projekteissa. Halkeamien syntymisen todennäköisyyttä on mahdollista ennakoida epätasaisuuden kasvun perusteella, kun vaurioita ei vielä havaita tien pinnassa.

Tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia ja luotuja hypoteeseja tullaan arvioimaan TPPT:n rakenne- ja koeratakokeiden sekä koeteiden tulosten tarkastelussa tutkimusohjelman myöhemmissä vaiheissa.

**Keywords** fatigue, fatigue criteria, traffic loading, distress, cracking, evenness, flexible pavements, semi-rigid pavements, TPPT, full-scale pavement tests

### **Abstract**

The aim of the Road Structures Research Program (TPPT) is to improve the functional performance of roads and to lower annual costs. The aim is attained by gaining control over the factors affecting the evenness of the road in the areas of fatigue, frost heave and geotechnical bearing capacity. The objective of this study was to investigate the effect of traffic loading on the evenness of the road surface. In addition, the objective was to develop fatigue criteria for road structure set by the surface evenness requirements.

The development of longitudinal unevenness of road surface due to cumulative traffic loading, and hence fatigue, was investigated based on OECD full-scale pavement tests carried out in Nantes, France, and Porvoo, Finland. The structures used in this study were both asphalt concrete and semi-rigid structures.

Based on the results, it is reported, that the connection between the appearance of the first crack and the growth of the unevenness of the road is clear. The first crack appears in the weakest point in the structure. The cracking starts at the bottom of the surface layer and causes surface unevenness before the first crack is observed in the surface. In the meantime, cracking is accelerated by the surface unevenness. As the cracking is increased, also the growth of the surface unevenness is strongly accelerated.

Therefore, the fatigue criteria is to prevent cracking. In other words, pavement rehabilitation should be done before cracking appears, otherwise the unevenness of the road grows rapidly and the fatigue resistance of the old structure is lost. Factors affecting cracking and thereby evenness are investigated in projects concerning fatigue life models. The probability of cracking can be predicted based on the increase of unevenness, when cracking is not yet observed in the road surface.

The results of and hypothesis developed in this study will be examined in the later phases of the TPPT research programme based on results from test structures, full scale tests and test roads.

## Esipuhe

Kuormituskestävyyden tavoitekriteerejä käsittelevä tutkimus on osa vuonna 1994 käynnistynyttä Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelmaa (TPPT). Projektikuvaus on esitetty TPPT:n tutkimussuunnitelmassa (Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT). Tutkimussuunnitelma vuosille 1994 - 2000. Tielaitoksen selvityksiä 7/1994), jossa sen tunnuksena on koodinumero 110.10.

Oheinen julkaisu on tutkimuksen loppuraportti. Tutkimukseen ovat osallistuneet tutkija Antti Ruotoistenmäki (VTT Yhdyskuntatekniikka), erikoistutkija Heikki Jämsä (VTT Yhdyskuntatekniikka) sekä tutkimusinsinööri Harri Spoof (VTT Yhdyskuntatekniikka).

Projektin tukiryhmään ovat kuuluneet erikoissuunnittelija Kari Hiltunen (tielaitos) sekä TkT Anssi Lampinen (AL-Engineering Oy).



---

**Sisältö**

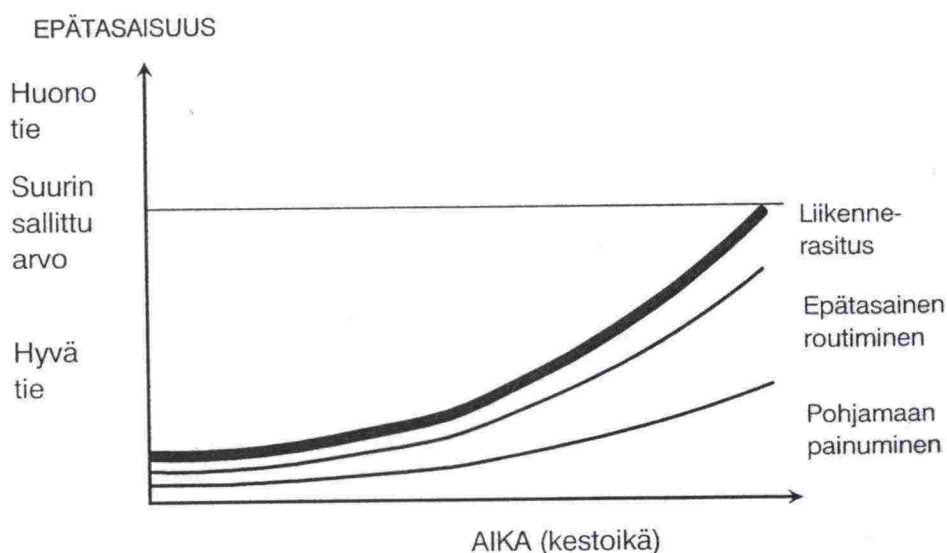
1	JOHDANTO	9
2	TAVOITTEET	10
3	KUORMITUSKESTÄVYYDEN VAIKUTUS TASAISUUTEEN	11
3.1	Vaurioitumisen ja tasaisuuden välinen yhteys	11
3.2	Nantesin koeratakokeet	11
3.2.1	Koejärjestelyt ja mittaukset	11
3.2.2	Asfalttibetonipäällysterakenteet	13
3.2.3	Maabetonirakenteet	18
3.3	Neste/OECD kiertoratakoe	22
3.3.1	Koejärjestelyt ja mittaukset	22
3.3.2	Asfalttibetonipäällysterakenteet	23
3.3.3	Maabetonirakenteet	25
4	JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO	28
5	KIRJALLISUUS	29

## 1 JOHDANTO

Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelman tavoitteena on sekä uusien että peruskorjattavien teiden liikennöitävyyden parantaminen siten, että vuosikustannukset alenevat ja ympäristölle aiheutuvat haitat minimoituvat (Saarela et. al. 1994).

Tutkimusohjelman tavoitteet saavutetaan parantamalla niiden tekijöiden hallintaa, jotka säätelevät tiestön tasaisuutta. Näiden tekijöiden hallitsemisella tuotetaan ennakoitavalla tavalla toimiva tierakenne, jolloin tien käyttöiän aikaiset kustannukset (vuosikustannus tai kustannusten nykyarvo) saadaan mahdollisimman alhaiseksi ympäristölliset reunaehdot huomioon ottaen.

Epätasaisuus ilmenee tienpinnan vaihtelevina aallonpituuksina tien pituus- ja poikkisuunnassa. Epätasaisuuteen vaikuttavat liikennesäätökset (kuormituskestävyys), epätasainen routiminen (ilmastorasitukset) sekä pohjamaan painuminen (geotekninen kantavuus). Tien pinnan epätasaisuus muodostuu näiden kolmen eri tekijän yhteisvaikutuksesta, jota on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Tien pinnan epätasaisuuteen vaikuttavat tekijät.

## 2 TAVOITTEET

Kuormituskestävyyden tavoitekriteerejä käsittelevä tutkimus liittyy tierakenteen kestoiän hallitsemiseen siten, että tien epätasaisuus ei lisäännä haitallisessa määrin kumulatiivisen liikennekuormituksen (kuormituskertaluvun) seurauksena.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten liikenteen kumulatiivinen kuormitus (kuormituskertaluku) vaikuttaa tien epätasaisuuden kehittymiseen. Lisäksi tutkimuksessa määritetään ne kriteerit, jotka tien tasaisuusvaatimus asettaa tierakenteen kuormituskestävyydelle. Kehitettävien tavoitekriteerien avulla varmistetaan, että rakenneratkaisut täyttävät niille asetetut tasaisuusvaatimukset tien elinkaaren aikana.

Tien epätasaisuuden kasvua kumulatiivisen liikennesäätötilanteen ja siitä aiheutuvan vaurioitumisen seurauksena tarkastellaan koeratakokeiden perusteella. Koeratakokeissa muut epätasaisuuteen vaikuttavat tekijät (ilmastorasitus ja pohjamaan painuminen) on suljettu pois, mikä mahdollistaa pelkästään liikennesäätötilanteen ja tasaisuuden välisen yhteyden selvittämisen. Tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia ja luotuja hypoteeseja tullaan arvioimaan TPPT:n rakenne- ja koeratakokeiden sekä koeteiden tulosten tarkastelussa tutkimusohjelman myöhemmissä vaiheissa.

### 3 KUORMITUSKESTÄVYYDEN VAIKUTUS TASAISUUTEEN

#### 3.1 Vaurioitumisen ja tasaisuuden välinen yhteys

Kuormituskestävyydellä tarkoitetaan tierakenteen kykyä vastustaa kumulatiivisesta liikennesituksesta aiheutuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Kuormituskestävyyden puute syntyy tierakenteen väsymisen seurauksena, mikä ilmenee tienpinnan halkeiluna. Halkeamien synty merkitsee rakenteen toiminnan kannalta epäjatkuvuuskohtia, jolloin liikennesitus ei jakaudu yhtä tehokkaasti ja laajalle alalle kuin ehjällä rakenteella. Tämä yhdistettynä tierakenteeseen halkeamien kautta pääsevän veden kanssa aiheuttaa entistä suurempia rasituksia tierakenteeseen.

Tavallisesti halkeamat esiintyvät tienpinnalla juuri niissä kohdissa, joissa materiaalien lujuus on heikoimmillaan ja muodonmuutokset ja taipumat rakenteessa suuria. Vaurioitumisen seurauksena tierakenteeseen syntyy pysyviä muodonmuutoksia päällysteessä, sitomattomissa kerroksissa ja/tai pohjamaassa, mikä aiheuttaa lopulta tienpinnan epätasaisuuden kasvua pituus- ja poikkisuunnassa.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan väsymisvaurioiden vaikutusta tien pituussuuntaiseen epätasaisuuteen. Tulokset perustuvat sekä Nantesin että Nesteen koeratakokeiden tuloksiin.

#### 3.2 Nantesin koeratakokeet

##### 3.2.1 Koejärjestelyt ja mittaukset

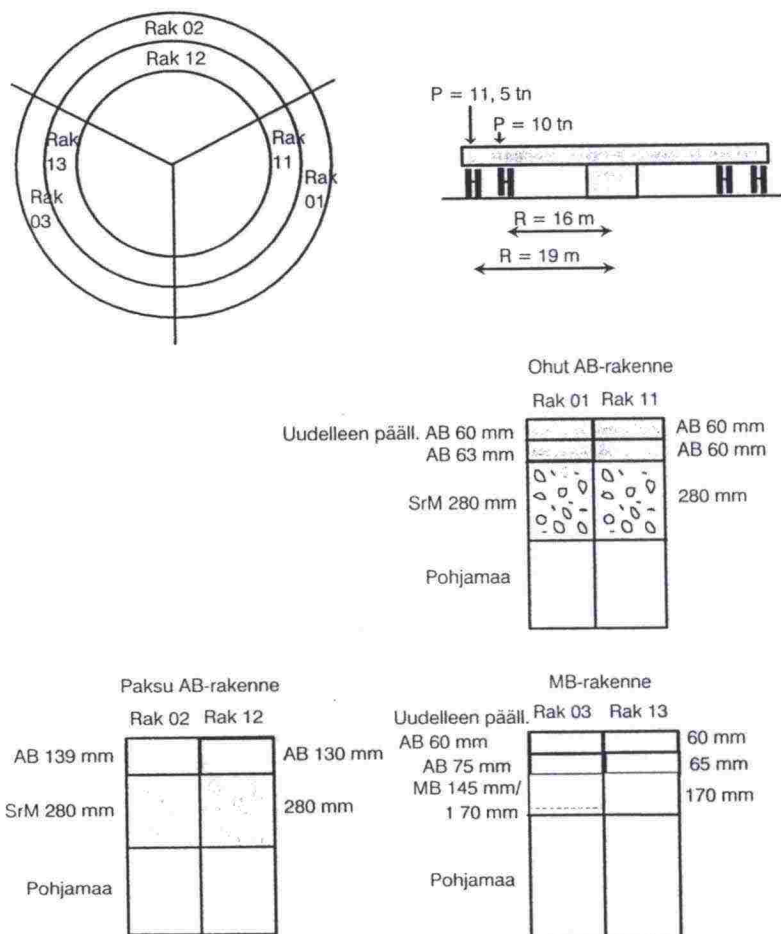
OECD:n tietutkimuksen projektissa tehtiin koeratakokeita vuonna 1989 LCPC:n (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) koeradalla Nantesissa Ranskassa (OECD 1991). Kokeissa tutkittiin kolmea erityyppistä tierakennetta: ohut ja paksu asfalttibetonipäällyste sitomattoman kantavan kerroksen päällä (AB-rakenne) sekä maabetonirakenne, jossa asfalttibetonipäällysteen alla on maabetonista rakennettu kantava kerros (MB-rakenne). Koerakenteet rakennettiin ympyränmuotoiselle radalle, jonka halkaisija oli 40 metriä. Rakenteita kuormitettiin pyörivällä kuormituslaitteella, jossa sisärataa (säde 16 metriä) kuormitettiin 10 tonnin akselipainoa vastaavalla kuormalla (5 tonnin pyöräpaino) ja ulkorataa (säde 19 metriä) kuormitettiin 11,5 tonnin akselipainoa vastaavalla kuormalla (5,75 tonnin pyöräpaino). Koeosuuksien pituus oli 33 (sisärata) tai 40 metriä (ulkorata). Kaavakuva radasta ja koerakenteista on esitetty kuvassa 2 (OECD 1991).



Kokeessa mitattiin radan pituusprofiili mittaamalla kuormituslaitteeseen kiinnitetyn pyörän pystyliikettä, kun kuormituslaitetta pyöritettiin mininopeudella (3 km/h). Päälysteen pintaan syntyneet vauriot merkittiin ja niiden määrä kirjattiin säännöllisesti muistiin. Osa profiilimittauksista ja vauriohavainnoista on tehty yhtä aikaa saman kuormituskertaluvun jälkeen, mutta suurin osa on tehty eriaikaisesti.

Radan pituusprofiilista määritettiin sen tasaisuus IRI-arvona. Profiili on mitattu tavallisimmin 15 - 20 mm välein. IRI-arvon laskentaa varten muodostettiin signaalinkäsittelyohjelmalla profiili, jossa suhteellinen korkeuslukema on määritetty 300 mm välein.

Kuormituskestävyyden ja tasaisuuden muuttumisen välisen yhteyden selvittämiseksi tarkastellaan tutkimuksessa tasaisuuden suhteellisia muutoksia kuormitusten kumuloitumisen seurauksena referenssipisteen ollessa lähtötilanteen tasaisuusarvo.



Kuva 2. OECD:n kiertoratakoee. Kaavakuva koeradasta ja koerakenteista (OECD 1991).

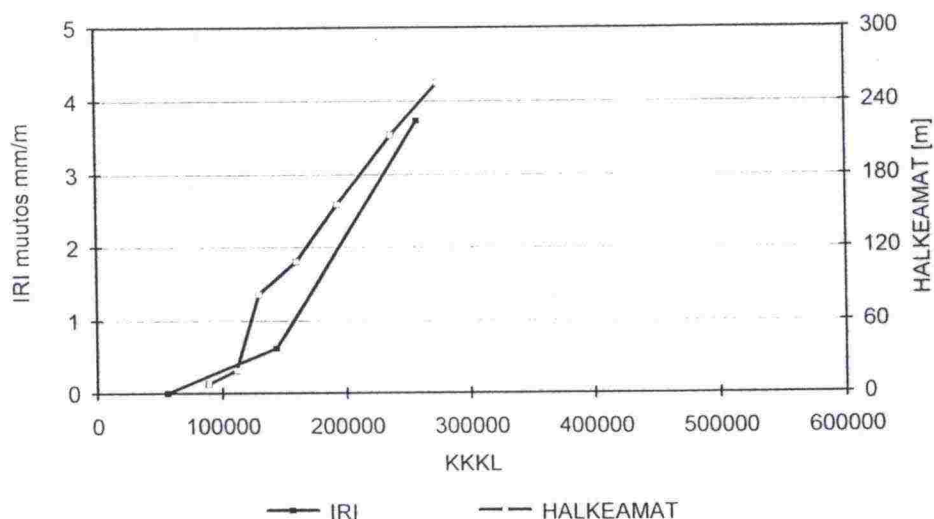
### 3.2.2 Asfalttibetonipäällysterakenteet

Seuraavassa käsitellään ohuen ja paksun asfalttibetonipäällysterakenteen tuloksia. Ohut AB - rakenne (01 ja 11) vaurioitui varsin nopeasti kokeen alussa, erityisesti 11,5 tonnin kuormituksella (rakenne 01). Paksulla AB-rakenteella (02 ja 12) ei tapahtunut vaurioitumista kokeen aikana.

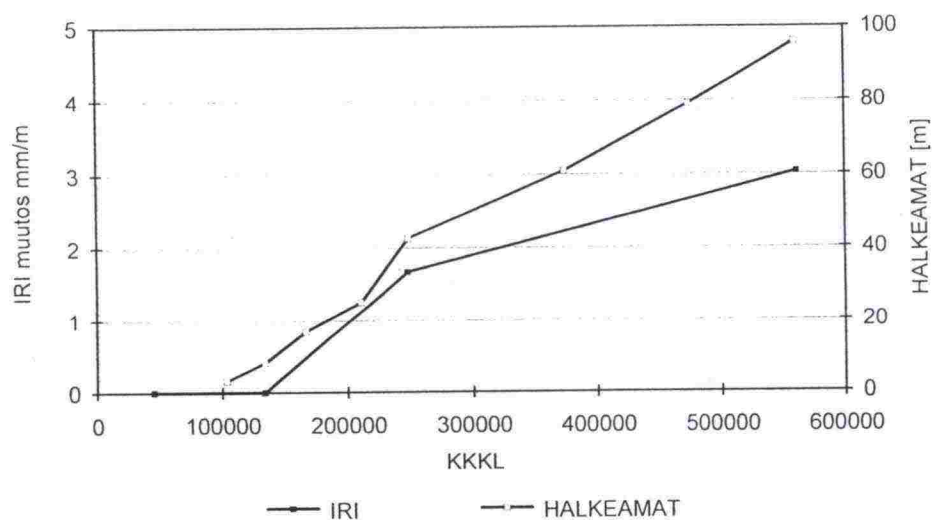
Kuvissa 3 - 4 on esitetty IRI-arvon muutos ja vauriokehitys kuormituskertaluvun kasvaessa ohuilla AB-rakenteilla. Kuvissa 5 - 6 on esitetty vastaavasti IRI:n riippuvuus vaurioitumisesta ohuilla AB-rakenteilla. Koska profiilimittaukset ja vauriokartoitukset on tehty rakenteella 01 eriaikaisesti, kuvassa 5 tiettyä vauriomäärää vastaava IRI - arvo on interpoloitu lineaarisesti mittaustuloksista.

Kuvista 3 ja 4 voidaan havaita tierakenteen kuormituskestävyydessä tapahtuvat tyypilliset muutokset kumulatiivisesta kuormituksesta aiheutuvan rakenteen väsymisen seurauksena. Tierakenne kestää ehjänä tiettyyn kuormitustasoon saakka, minkä jälkeen rakenteen vaurioituminen alkaa kiihtyvällä nopeudella.

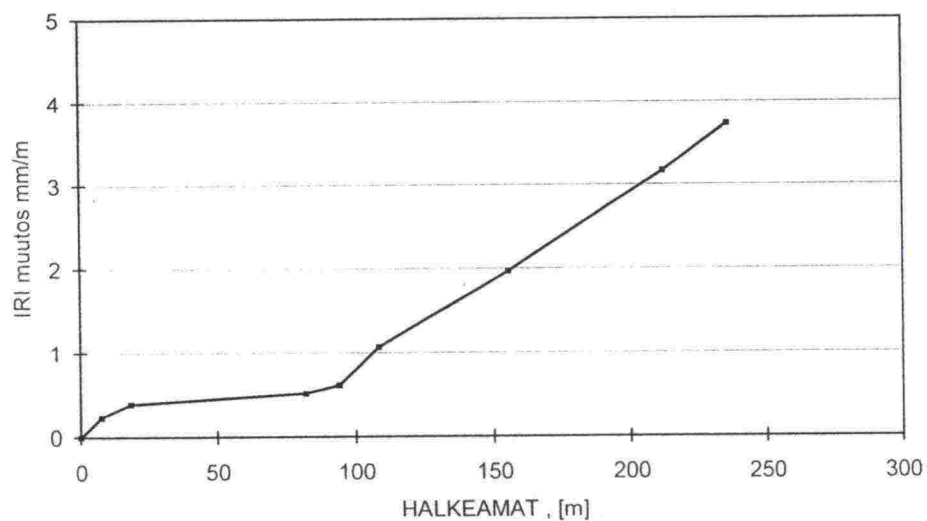
Tuloksista voidaan myös selvästi todeta, että epätasaisuuden lisääntyminen on tapahtunut samanaikaisesti ensimmäisten vaurioiden esiintymisen kanssa (kuvat 5 ja 6). Todellisuudessa halkeamat ovat syntyneet jo aikaisemmin päällysteen alapinnassa, josta ne tulevat tien pinnalle näkyviin tietyllä viiveellä.



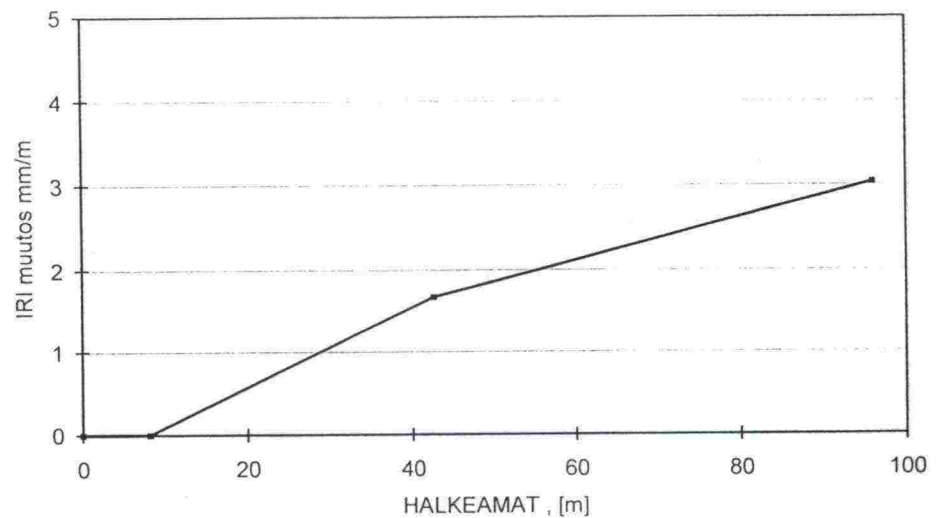
Kuva 3. OECD:n kiertoratakoe. Tasaisuuden ja vaurioiden kehitys ohuella AB-rakenteella (rakenne 01, 11,5 tn akselipaino).



Kuva 4. OECD:n kiertoratakoee. Tasaisuuden ja vaurioiden kehitys ohuella AB-rakenteella (rakenne 11, 10,0 tn akselipaino).



Kuva 5. OECD:n kiertoratakoee. Väsymisvaurioiden ja epätasaisuuden muutoksen välinen yhteys ohuella AB-rakenteella (rakenne 01, 11,5 tn akselipaino).



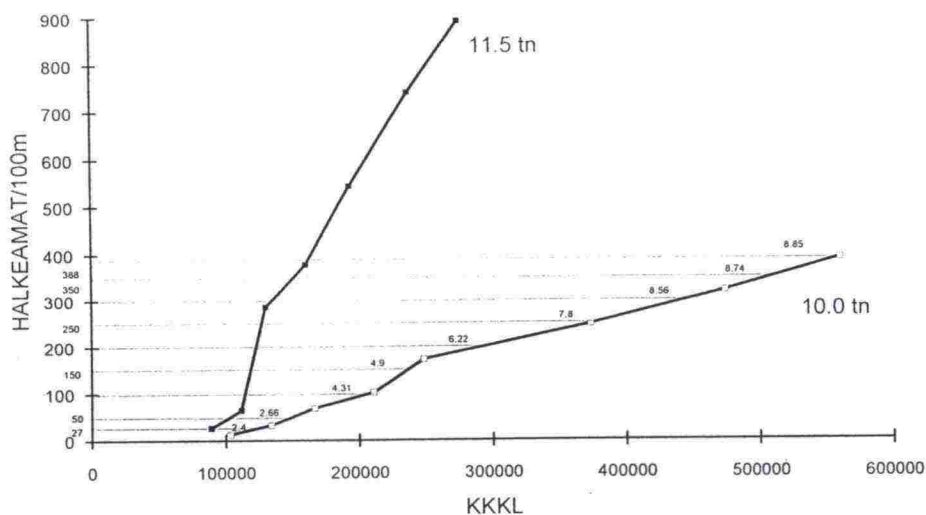
Kuva 6. OECD:n kiertoratakoee. Väsymisvaurioiden ja epätasaisuuden muutoksen välinen yhteys ohuella AB-rakenteella (rakenne 11, 10,0 tn akselipaino).

Liikennesäätösuuren suuruudella on vaikutusta tierakenteen vaurioitumisnopeuteen ja sitä kautta epätasaisuuden kasvuun. Kuvista 3 ja 4 havaitaan, että vaurioituminen on selkeästi nopeampaa 11,5 kuin 10 tonnin akselipainolla. Akselipainon vaikutusta rakenteen vaurioitumiseen voidaan kuvata kaavan 1 avulla seuraavasti:

$$\left(\frac{11,5}{10}\right)^x = \left(\frac{N_{10}}{N_{11,5}}\right) \quad (1)$$

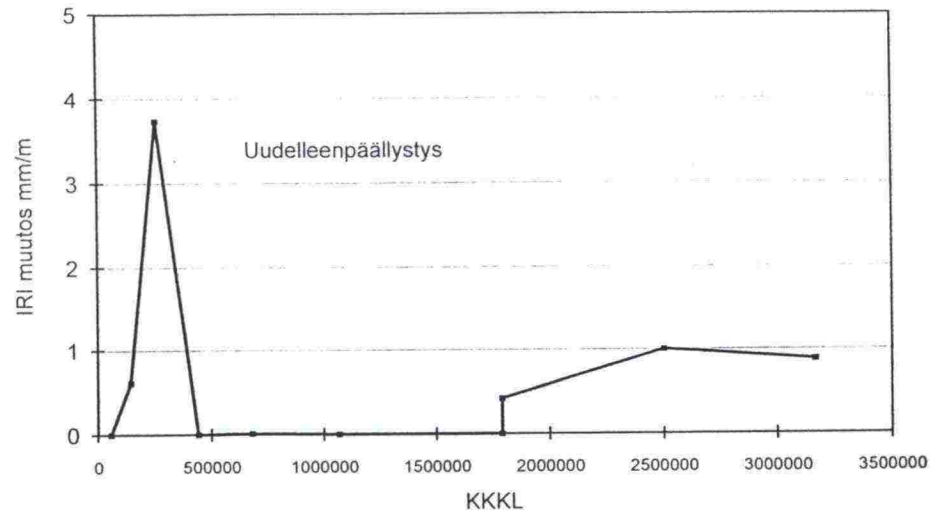
missä  $N_{10}$  ja  $N_{11,5}$  ovat rakenteen kestävät kuormituskertaluvut 10 ja 11,5 tonnin akselipainoilla tietyllä vauriomäärällä. Eksponentti  $x$  muuttuu kokeen aikana vauriomäärän ja kuormituskertaluvun kasvaessa kuvassa 7 esitetyllä tavalla. Tämä merkitsee sitä, että eri akselipainojen vastaavuuskertoimet eivät ole vakioita, vaan ne vaihtelevat tien vaurioitumisasteen perusteella. Mitä enemmän tie on vaurioitunut, sitä suurempi rasitusvaikutus (suurempi eksponentin arvo) tiehen kohdistuu johtaen epätasaisuuden nopeampaan kasvuun (OECD 1991).





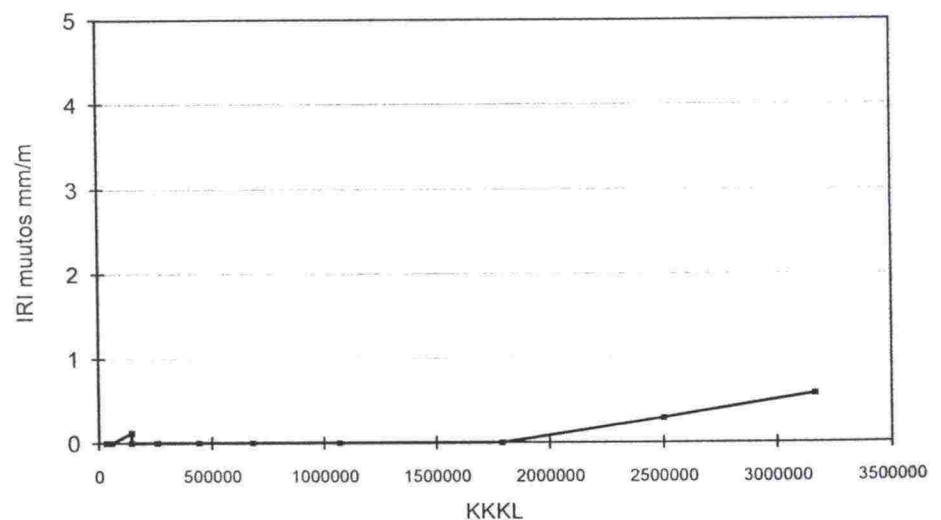
Kuva 7. OECD:n kiertoratakoee. Akselipainon vaikutus rakenteen vaurioitumiseen. Kaavan 1 eksponenttiarvon muuttuminen vaurioitumisen lisääntyessä (OECD 1991).

Tutkimuksessa selvitettiin myös uudelleenpäällystämisen vaikutusta vaurioitumiseen ja tasaisuuden muuttumiseen. Rakenne 01 (ohut AB, 11,5 tonnin akselipaino) päällystettiin uudelleen 300 000 kuormituskerran kohdalla, jolloin rakenne oli täysin vaurioitunut (kuvan 3 tilanne). Päällystämisen vaikutuksesta rakenteessa ei ilmennyt enää vaurioita kokeen aikana. Kuvassa 8 on esitetty rakenteella tapahtunut IRI-arvon muutos ennen päällystämistä ja sen jälkeen. Tuloksista voidaan selkeästi havaita, että rakenteen epätasaisuus ei lisäännä silloin, kun rakenne säilyy ehjänä (ei vaurioita). Lasketuissa IRI-arvoissa on pientä vaihtelua, mutta merkittäviä tasaisuuden muutoksia ei tapahdu.

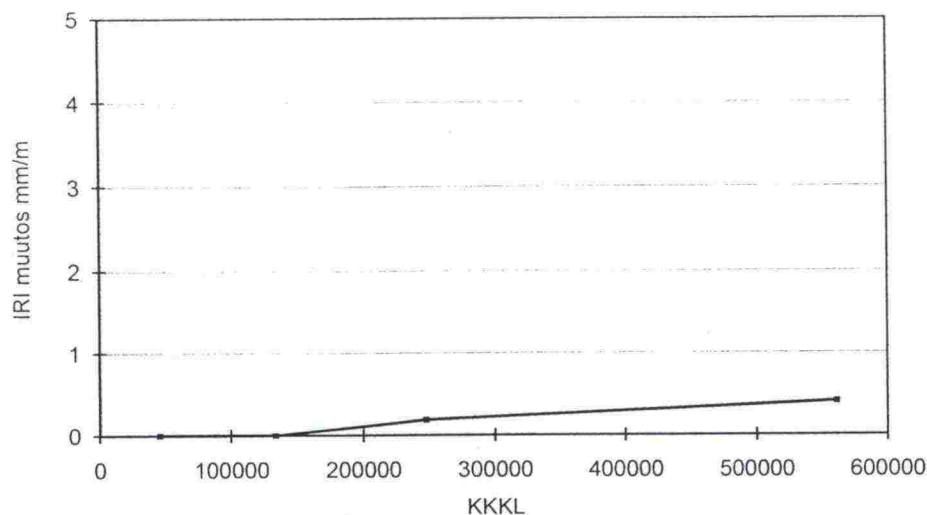


Kuva 8. Tasaisuuden muutos ohuella AB - rakenteella päällystämisen jälkeen (rakenne 01, 11,5 tonnin akselipaino). Päällystämisen jälkeen tierakenteessa ei esiintynyt vaurioita.

Paksulla AB-rakenteella ei tapahtunut vaurioitumista lainkaan kokeen aikana. Rakenteiden tasaisuuden muutos on esitetty kuvissa 9 ja 10. Myös näistä kuvista voidaan selvästi todeta, että tien epätasaisuudessa ei tapahdu muutoksia silloin, kun tienpinta pysyy vaurioitumattomana.



Kuva 9. Tasaisuuden muutos paksulla AB - rakenteella (11,5 tn akselipaino). Rakenteessa ei vaurioita.



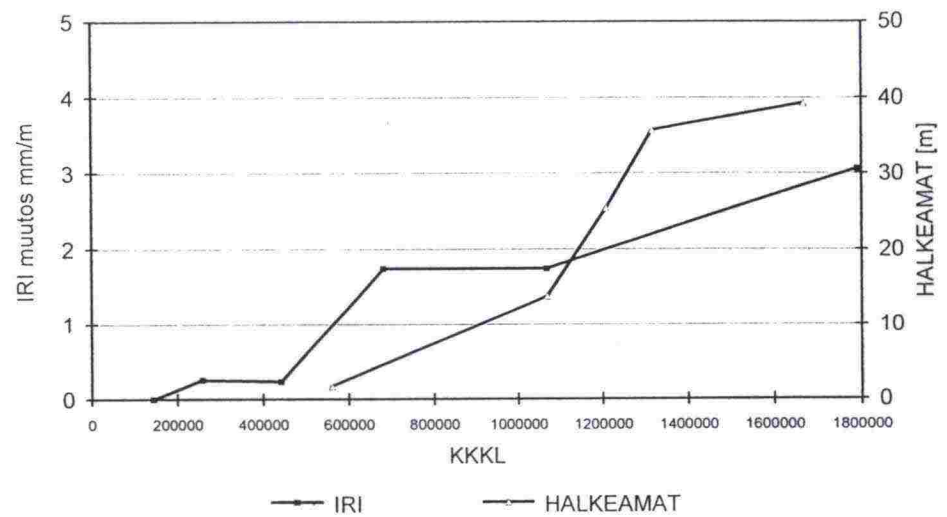
Kuva 10. Tasaisuuden muutos paksulla AB - rakenteella (10,0 tn akselipaino). Rakenteessa ei vaurioita.

### 3.2.3 Maabetonirakenteet

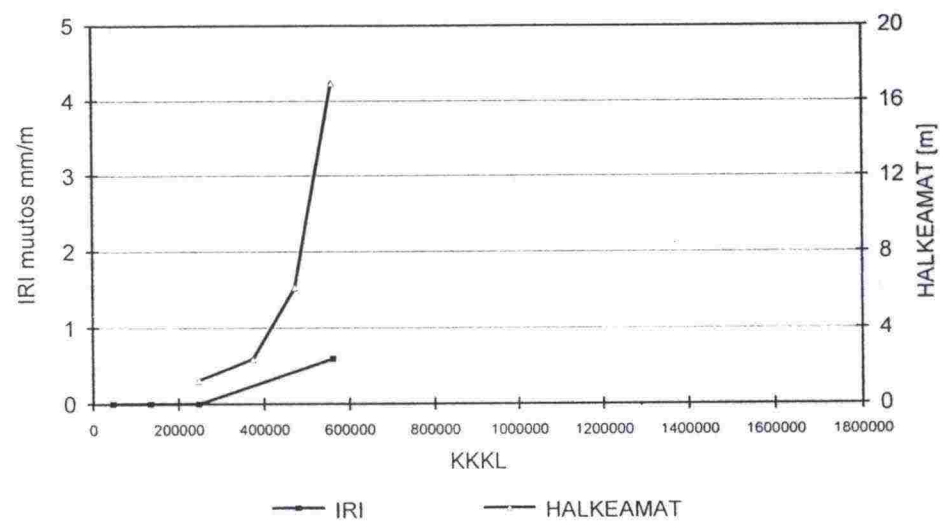
Kuvissa 11 - 12 on esitetty IRI-arvon muutos ja vauriokehitys kuormituskertaluvun kasvaessa maabetonirakenteilla (rakenne 03, 11,5 tonnin akselipaino ja rakenne 13, 10,0 tonnin akselipaino). Kuvissa 13 - 14 on esitetty vastaavasti IRI:n riippuvuus vaurioitumisesta maabetonirakenteilla. Maabetonirakenne kestää liikennekuormitusta huomattavasti paremmin kuin ohut AB-rakenne. Tämä näkyy siitä, että epätasaisuus alkaa lisääntyä ja ensimmäiset vauriot havaitaan vasta noin 400 000 kuormituskerran jälkeen. Myös maabetonirakenteilla epätasaisuus alkaa lisääntyä ensimmäisten vaurioiden syntyessä.

Koska profiilimittaukset ja vauriokartoitukset on tehty rakenteella 03 (11,5 tonnin akselipaino) osittain eriaikaisesti, kuvassa 13 suurinta vauriomäärää vastaava IRI - arvo on interpoloitu lineaarisesti tuloksista.

Suuremmalla pyöräpainolla kuormitettu maabetonirakenne (03, 11,5 tonnia) päällystettiin uudelleen noin 1 800 000 kuormituksen jälkeen, minkä jälkeen rakenteessa ei tapahtunut enää vaurioitumista kokeen aikana. Kuvassa 15 on esitetty rakenteen IRI - arvon muutos ennen päällystämistä ja sen jälkeen. Myös maabetonirakenteella havaitaan vastaava tulos kuin asfalttibetonirakenteella, eli rakenteen pysyessä ehjänä myöskään epätasaisuudessa ei tapahdu kasvua.

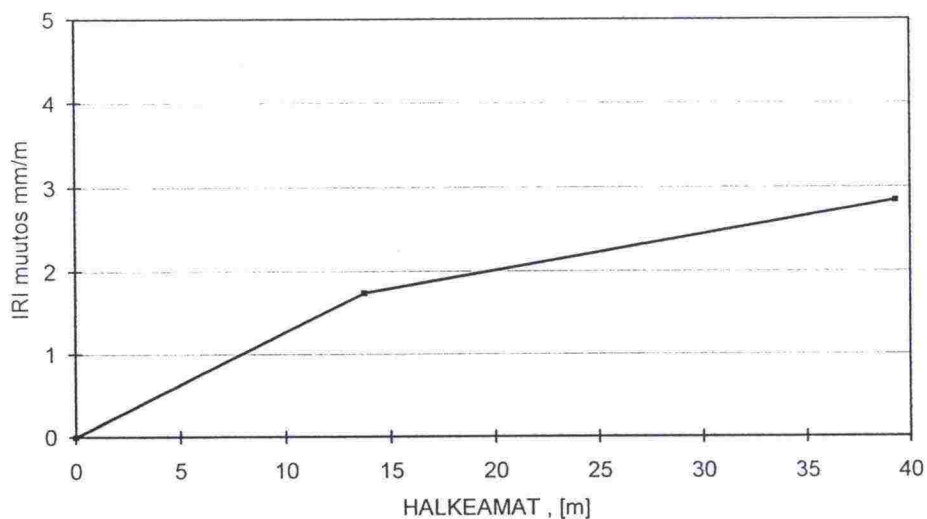


Kuva 11. OECD:n kiertoratakoe. Tasaisuuden ja vaurioiden kehitys MB-rakenteella. 11,5 tn akselipaino.

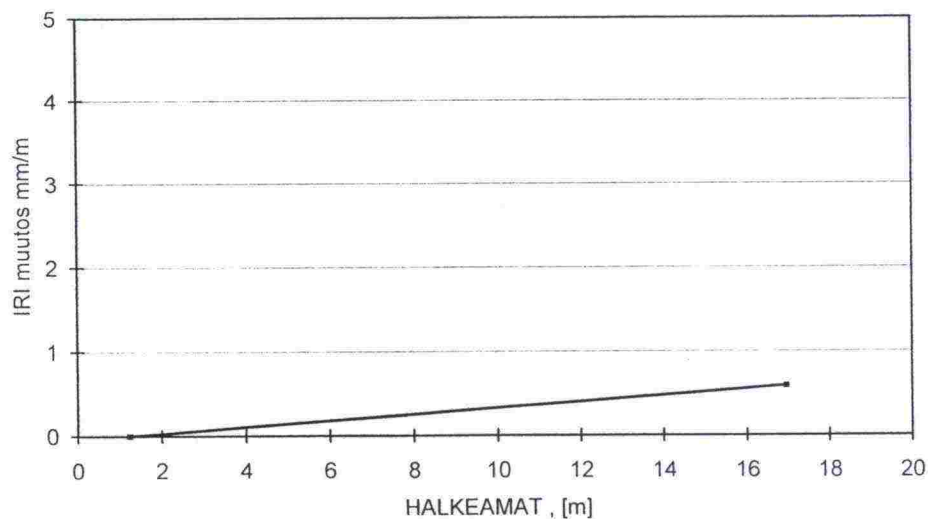


Kuva 12. OECD:n kiertoratakoe. Tasaisuuden ja vaurioiden kehitys MB-rakenteella. 10,0 tn akselipaino.





Kuva 13. OECD:n kiertoratakoe. Väsymisvaurioiden ja epätasaisuuden muutoksen välinen yhteys MB-rakenteella (11,5 tn akselipaino).

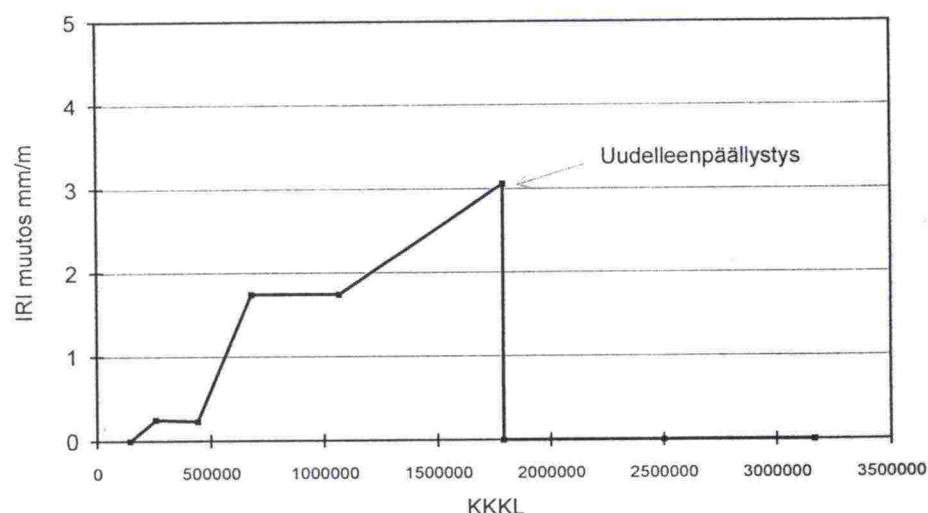


Kuva 14. OECD:n kiertoratakoe. Väsymisvaurioiden ja epätasaisuuden muutoksen välinen yhteys MB-rakenteella (10,0 tn akselipaino).

Sekä AB - että MB - rakenteilla havaitaan, että vaurioituminen ja epätasaisuuden kasvu liittyvät läheisesti yhteen. Kerran alettuaan vaurioituminen nopeutuu jatkuvasti. Päällysteen alapintaan syntyneet halkeamat, jotka eivät vielä näy rakenteen pinnalla, aiheuttavat kuitenkin pinnan epätasaisuutta. Kun halkeama tulee näkyviin rakenteen pinnalla, päällyste katkeaa, jolloin sen laattavaikutus vähenee. Päällysteeseen syntyy pysyviä muodonmuutoksia, jotka aiheuttavat epätasaisuuden nopeaa kasvua. Toisaalta lisääntynyt

epätasaisuus aiheuttaa rakenteen dynaamisen rasituksen lisääntymistä, mikä puolestaan kiihdyttää vaurioitumista.

Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että vanhan päällysteen rakenteellista lujuutta voidaan käyttää hyväksi vain, mikäli korjaustoimenpiteet tehdään hyvissä ajoin, eikä vasta kun päällyste on jo vaurioitunut. Kuormituskestävyydspuutteesta aiheutuvien väsymisvaurioiden kunnossapidon lykkääminen johtaa epätasaisuuden nopeaan kasvuun ja vanhan rakenteen tilan huonontumiseen kiihtyvällä vauhdilla.



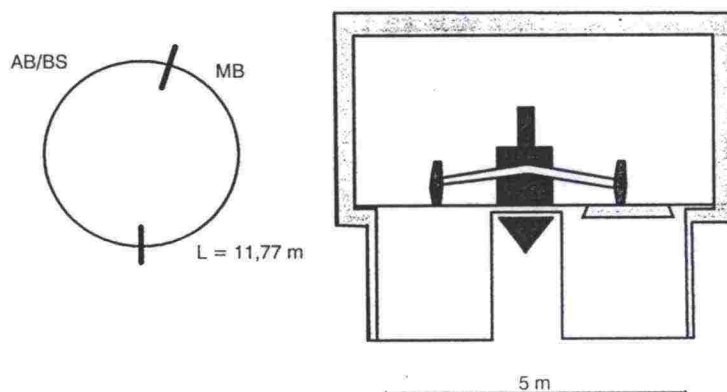
Kuva 15. Tasaisuuden muutos MB - rakenteella (rakenne 03, 11,5 tonnin akselipaino) päällystämisen jälkeen. Päällystämisen jälkeen tierakenteessa ei esiintynyt vaurioita.

### 3.3 Neste/OECD kiertoratakoee

#### 3.3.1 Koejärjestelyt ja mittaukset

Neste Oy:n kantavuusradalla Porvoon laitoksilla suoritettiin vuonna 1991 OECD:n kiertoratakoekseen liittyen satelliittikoe. OECD:n Nantesissa suoritettun pääkokeen tuloksia on käsitelty edellisessä luvussa.

Kokeissa tutkittiin kolmea erityyppistä tierakennetta: ohut ja paksu asfalttibe-tonipäällyste sitomattoman kantavan kerroksen päällä sekä maabetoniraken-ne (kantava kerros maabetonia). Koerakenteet rakennettiin ympyränmuotoi-selle radalle, jonka halkaisija oli viisi metriä. Rakenteita kuormitettiin pyörivällä kuormituslaitteella 5 tonnin akselipainoa vastaavalla kuormalla (2,5 tonnin pyöräpaino). Koeosuuksien pituus oli noin kuusi metriä. Kaavakuva ra-dasta ja koerakenteista on esitetty kuvassa 16 (Pihlajamäki, 1992).



#### OECD/NANTES-NESTE

I	II	III
<div>AB 60 mm</div> <div>SrM 380 mm</div> <div>Hk</div>	<div>AB 60 mm</div> <div>BS 80 mm</div> <div>SrM 300 mm</div> <div>Hk</div>	<div>AB 60 mm</div> <div>MB 180 mm</div> <div>SrM<sub>1</sub> 100 mm</div> <div>Hk</div>

Kuva 16. Nesteen kiertoratakoee. Kaavakuva koejärjestelystä (Pihlajamäki 1992).

Koerata on sijoitettu tutkimushalliin ja koerakenteet rakennettu betonialtaaseen, joten lämpötila ja pohjaveden pinnan taso ovat säädettävissä. Kokeen ensimmäisessä vaiheessa veden pinta oli aluksi tasolla 1,2 m rakenteen pinnasta. Vedenpinta nostettiin tasolle 0,4 m pinnasta 7,3 miljoonan kuormituksen jälkeen ja tasolle 0,2 m pinnasta 10,6 miljoonan kuormituksen jälkeen. Kokeen ensimmäinen vaihe lopetettiin 13,5 miljoonan kuormituksen jälkeen. Rikkoutunut bitumisorakenne (BS) korvattiin ohuella AB - päällysteellä ja maabetonirakenne päällystettiin uudestaan. Kokeen toisen vaiheen kuormitusajojen (6,4 miljoonaa kuormitusta) aikana veden pinta oli tasolla 0,2 m rakenteen pinnasta (Pihlajamäki 1992).

Kokeessa mitattiin tasaisuus vaaitsemalla radan pituusprofiili pyörän kulkuurassa. Päällysteen pintaan syntyneet vauriot merkittiin ja niiden määrä kirjattiin säännöllisesti muistiin. Osa profilimittauksista ja vauriohavainnoista on tehty yhtä aikaa saman kuormituskertaluvun jälkeen, mutta suurin osa on tehty eriaikaisesti.

Nesteen koerata on pienikokoinen (halkaisija viisi metriä), mikä aiheuttaa tulosten tulkinnan ja luotettavuuden kannalta epävarmuutta. Esimerkiksi valmiin rakenteen pinnan alkuepätasaisuus on suuri johtuen käytetystä rakentamistekniikasta. Pienen kaarresäteen vuoksi pyörän nopeus on pienehkö ja hierto merkittävä. Eri tekijöiden vaikutuksesta tasaisuustuloksissa on hajontaa. Tästä syystä Nesteen kokeen tulokset eivät ole yhtä luotettavia kuin Nantesin kokeen tulokset.

### 3.3.2 Asfalttibetonipäällysterakenteet

Kuvissa 17 - 18 on esitetty IRI-arvon muutos kuormituskertaluvun kasvaessa AB - ja BS - rakenteilla (ohut ja paksu AB - rakenne). Kuvissa 19 - 20 on esitetty IRI:n riippuvuus vaurioitumisesta samoilla rakenteilla. Vauriomäärän kuvaamiseksi on erityyppiset halkeamat yhdistetty seuraavasti (kaava 2):

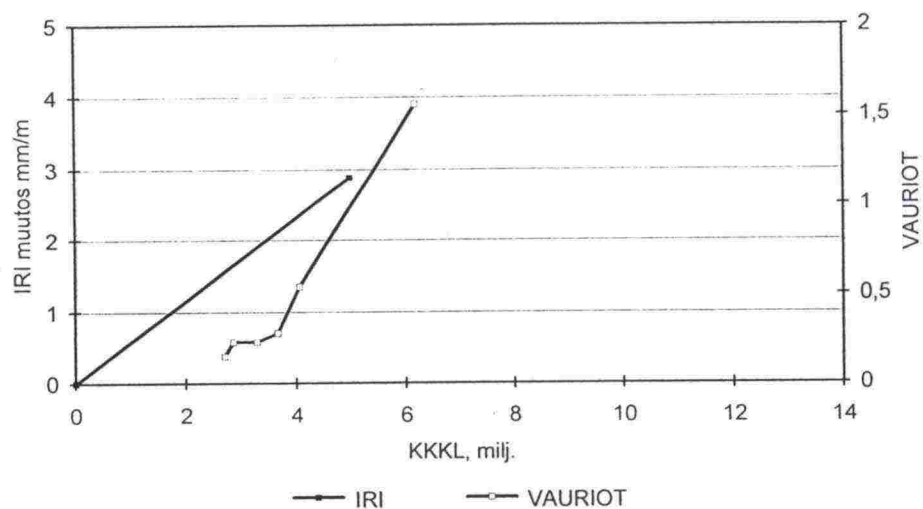
$$\text{Vauriomäärä} = \text{Verkkohalkeama (m}^2\text{)} + 0,1 * \text{Pituushalkeama (m)}(2)$$

Vauriomäärän lukuarvo kuvissa 17 - 24 on pieni (0 - 2), mutta radan pienen koon vuoksi jo esim. vauriomäärä = 1 edustaa rakenteen merkittävää vaurioitumista. Koska epätasaisuuden lähtöarvo on korkea, tässä on tarkasteltu tasaisuuden muutosta vastaavalla tavalla kuin Nantesin tulosten tarkastelussa.

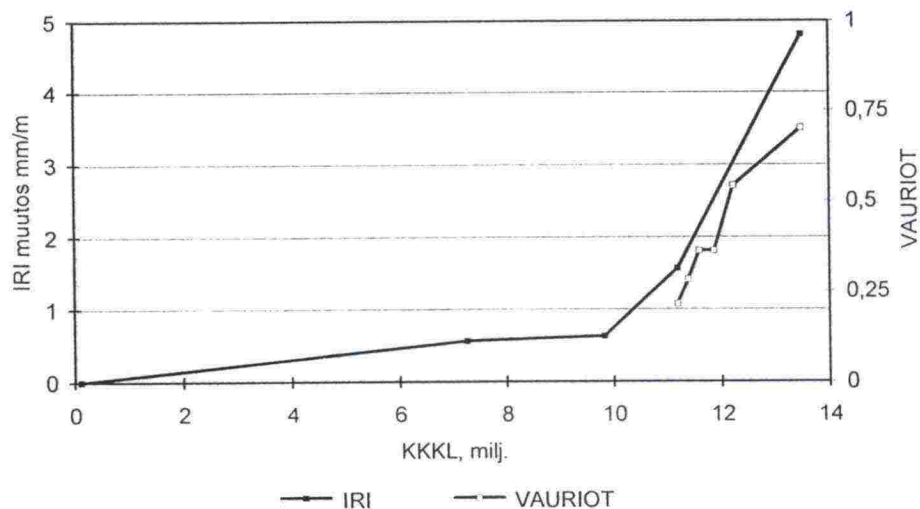
Tuloksista voidaan selvästi todeta sama ilmiö kuin Nantesin kokeessa. Ts. epätasaisuuden lisääntyminen on tapahtunut samanaikaisesti ensimmäisten vaurioiden esiintymisen kanssa. Ensimmäiset vauriot havaittiin melko myöhään ja vaurioiden havaitsemisessa kokeen aikana oli vaikeuksia



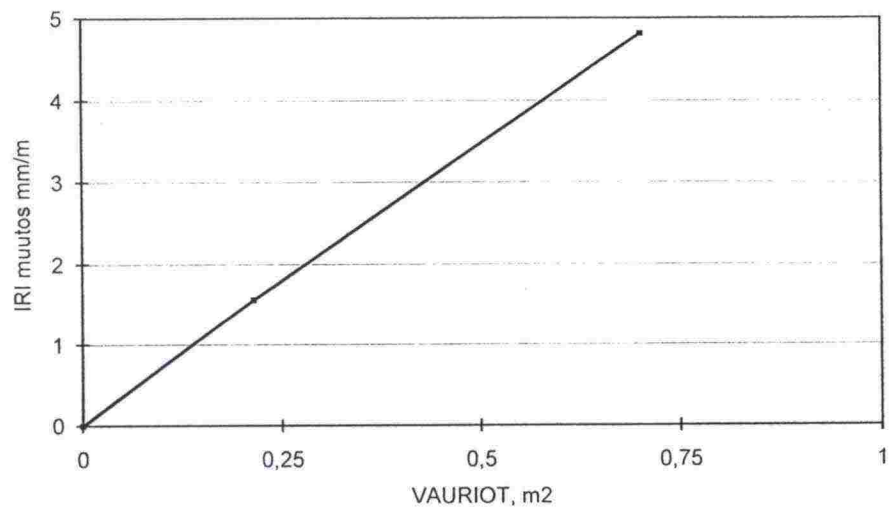
(Pihlajamäki 1992). On kuitenkin oletettavaa, että epätasaisuuden kasvu liittyy läheisesti vauriomäärän kasvuun.



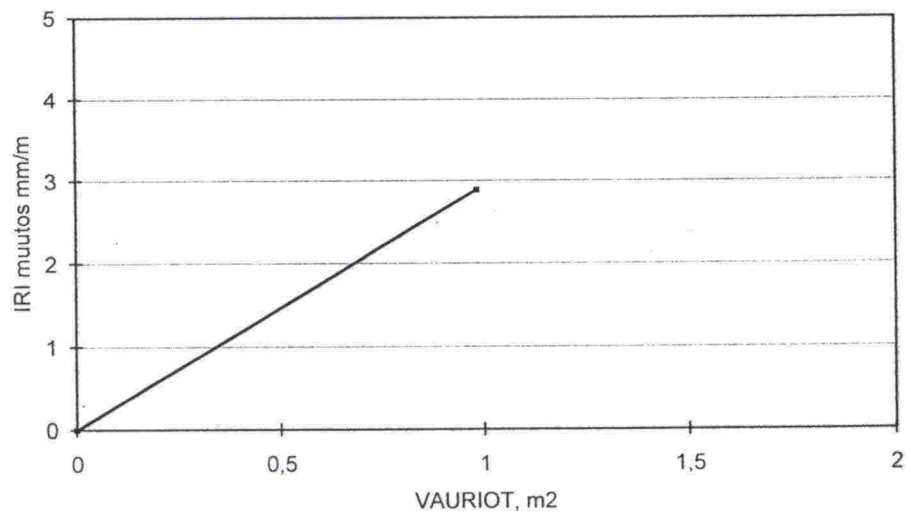
Kuva 17. Nesteen kiertoratakoe. Tasaisuuden ja vaurioiden kehitys AB-rakenteella.



Kuva 18. Nesteen kiertoratakoe. Tasaisuuden ja vaurioiden kehitys BS-rakenteella.



Kuva 19. Nesteen kiertoratakoee. Väsymisvaurioiden ja epätasaisuuden muutoksen välinen yhteys AB-rakenteella.

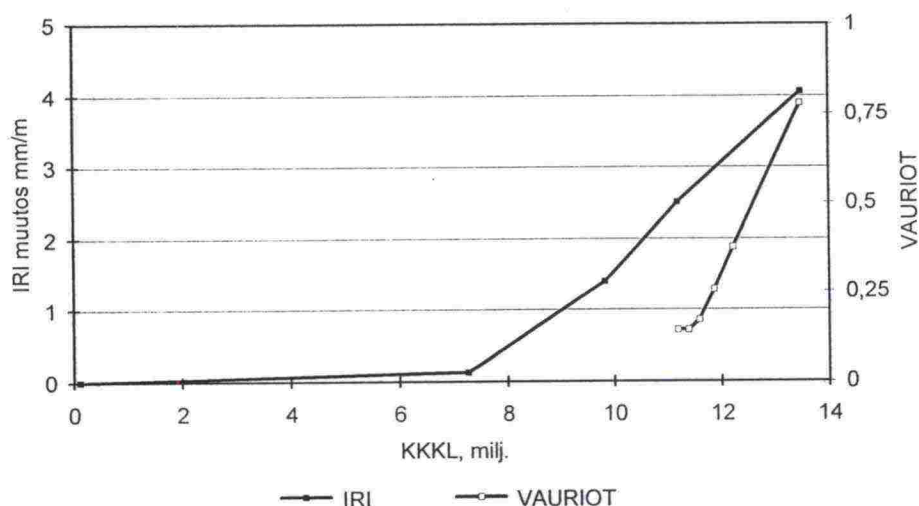


Kuva 20. Nesteen kiertoratakoee. Väsymisvaurioiden ja epätasaisuuden muutoksen välinen yhteys BS-rakenteella.

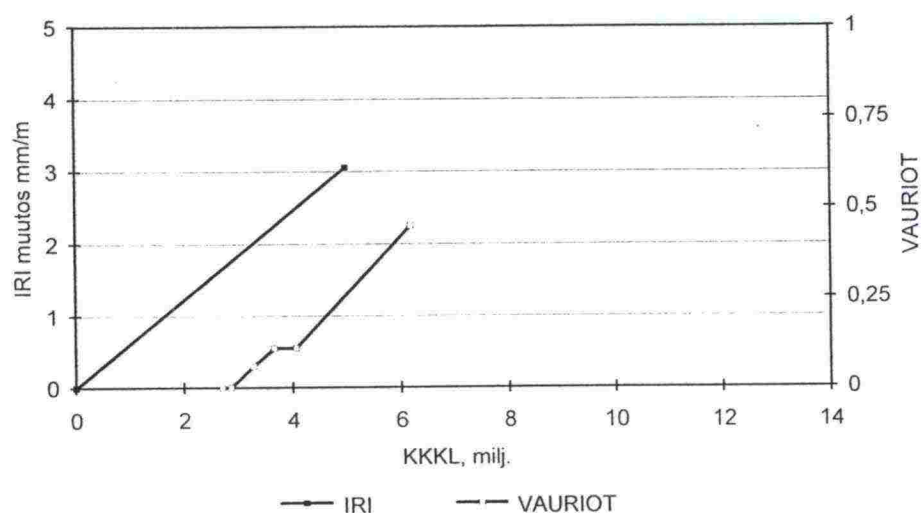
### 3.3.3 Maabetonirakenteet

Kuvissa 21 - 22 on esitetty IRI-arvon muutos ja vauriomäärän kasvu kuormituskertaluvun kasvaessa maabetonirakenteilla. Kuvissa 23 - 24 on esitetty IRI:n riippuvuus vaurioitumisesta samoilla rakenteilla. Kuvissa 21 ja 23 on esitetty rakenteen epätasaisuuden ja vaurion kehittyminen kokeen ensimmäisessä vaiheessa ja kuvissa 22 ja 24 kokeen toisen vaiheen tulokset.

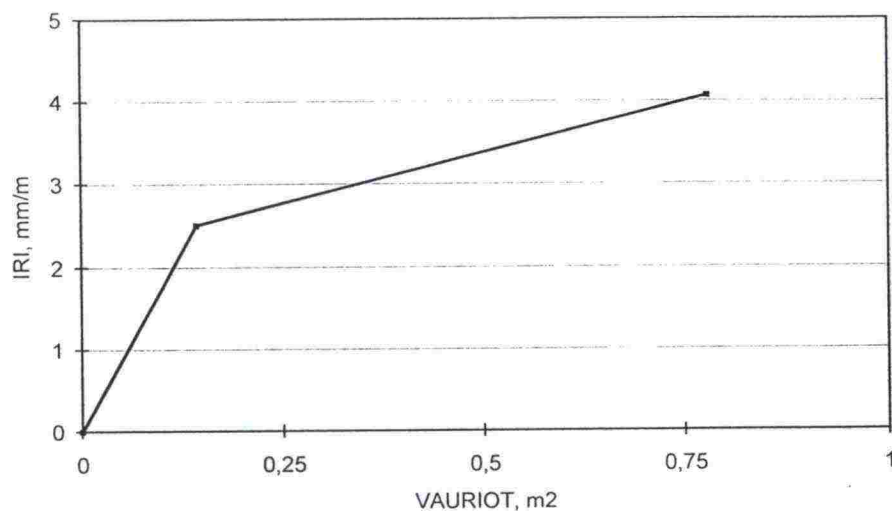
Nantesin kokeiden perusteella voitiin todeta, että myös maabetonirakenteilla epätasaisuuden lisääntyminen ja vaurioituminen liittyivät läheisesti toisiinsa. Myös Nesteen kokeessa havaitaan epätasaisuuden kasvua ennen ensimmäisen vaurion havaitsemista sekä AB- että MB- rakenteilla. Ilmeisesti päällysteen alapinnan halkeamat lisäävät rakenteen epätasaisuutta ennen niiden havaitsemista rakenteen pinnassa. Myös Nesteen kokeessa epätasaisuuden lisääntyminen ja vaurioituminen nopeutuvat ensimmäisten vaurioiden ilmaannuttua.



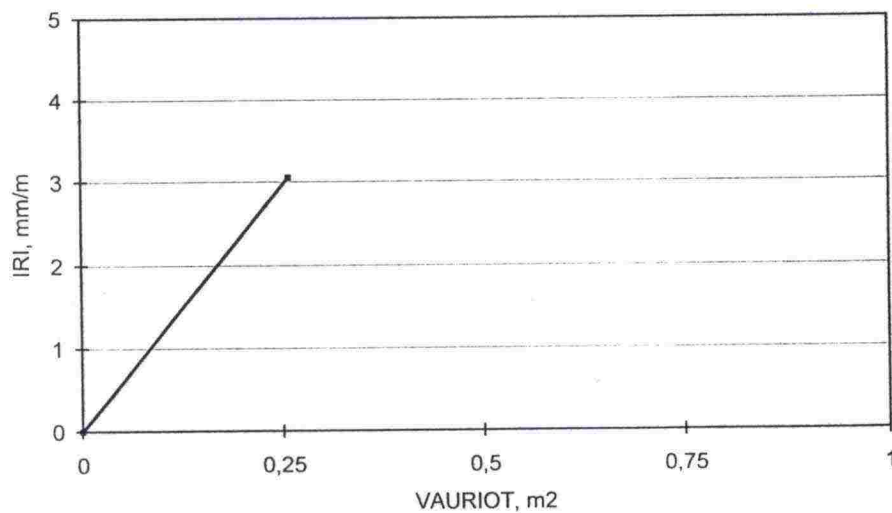
Kuva 21. Nesteen kiertoratakoe. Tasaisuuden ja vaurioiden kehitys MB-rakenteella kokeen ensimmäisessä vaiheessa.



Kuva 22. Nesteen kiertoratakoe. Tasaisuuden ja vaurioiden kehitys MB-rakenteella kokeen toisessa vaiheessa.



Kuva 23. Nesteen kiertoratakoee. Väsymisvaurioiden ja epätasaisuuden muutoksen välinen yhteys MB-rakenteella kokeen ensimmäisessä vaiheessa.



Kuva 24. Nesteen kiertoratakoee. Väsymisvaurioiden ja epätasaisuuden muutoksen välinen yhteys MB-rakenteella kokeen toisessa vaiheessa.



## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Epätasaisuus ilmenee tienpinnan vaihtelevina aallonpituuksina tien pituus- ja poikkisuunnassa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten liikennekuormitus (kuormituskertaluku) vaikuttaa tien pituussuuntaiseen epätasaisuuteen.

Tierakenteen vaurioitumisen ja tasaisuuden välistä yhteyttä tutkittiin Nantesin ja Nesteen koeratakokeiden perusteella. Kokeissa tutkittiin sekä asfalttibetonietta maabetonirakenteita. Tulosten perusteella todetaan, että:

- 1) Vaurioitumisen ja epätasaisuuden kasvun välinen yhteys on selkeä.
- 2) Vaurioituminen alkaa päällysteen pohjassa ja aiheuttaa pinnan epätasaisuutta jo ennen kuin vauriot havaitaan pinnassa. Samanaikaisesti pinnan lisääntynyt epätasaisuus kiihdyttää rakenteen vaurioitumista.
- 3) Halkeama syntyy ensiksi rakenteen heikoimpaan kohtaan. Tämä kohta ei ota kuormituksia vastaan yhtä hyvin kuin ehjä päällyste. Tästä on seurauksena pysyviä muodonmuutoksia pituusprofiilissa vahvojen ja heikkojen kohtien välillä ja rakenteen epätasaisuuden kasvu.
- 4) Vauriomäärän kasvaessa epätasaisuuden kasvu kiihtyy voimakkaasti.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tierakenteen tasaisuuden säilyttäminen kuormituskestävyyden näkökulmasta edellyttää, että tien ei anneta vaurioitua. Ts. kunnostamistoimenpiteet tulisi tehdä ennen halkeilua, muuten seurauksena on epätasaisuuden nopea kasvu ja vanhan rakenteen kuormituskestävyyden menetys. Halkeamien syntymisen todennäköisyyttä on mahdollista ennakoida epätasaisuuden kasvun perusteella, kun vaurioita ei vielä havaita tien pinnassa.

Kuormituskestävyyden tavoitekriteerinä on näin ollen halkeamien syntymisen estäminen. Tämän vuoksi tarvitaan mallit, joiden avulla voidaan ennustaa olemassa olevan tierakenteen vaurioitumisajankohta ja tien jäljellä oleva kestoikä. Vastaavasti uusien teiden kuormituskestävyyden mitoitus varten tarvitaan uudet ohjeet, jotka ottavat huomioon tierakenteen vaurioitumisen ajankohdan sekä vaurioiden lisääntymisen suhteessa tierakenteille asetettuihin tasaisuusvaatimuksiin.

Halkeamien ajankohdan ennustamista käsitellään projektissa Kuormituskestävyydshallien arvioiminen havaintotietäineistolla (110.50) Rakenteen jäännösarvoa käsitellään projektissa Pohjasuhteet ja vanhan rakenteen tila (110.20).

## 5 KIRJALLISUUS

- 1 OECD full-scale pavement test. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Road Transport Research. Scientific Expert Group I4. Paris 1991. 266 s.
- 2 Pihlajamäki, J., Satelliittikoe Neste Oy:n kantavuusradalla. OECD:n vertailukoe. VTT, Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 86. Espoo, marraskuu 1992.
- 3 Saarela, A., Jämsä, H., Törnqvist, J., Tamminne, M. & Saarelainen, S., Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT). Tutkimussuunnitelma vuosille 1994 - 2000. Tielaitoksen selvityksiä 7/1994.